

文章编号: 1000-7032(2026)03-0497-08

基于双段拼接掺铒光纤种子源的超短脉冲光纤激光器

晁举庆, 王 蓓*, 张国晗, 徐斌斌

(长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 报道了一种基于双段拼接掺铒光纤种子源的飞秒(超短脉冲)光纤激光器。该激光器由种子源、两级光纤放大器以及脉冲压缩部分组成。种子源是单壁碳纳米管(SWCNT)锁模的掺铒光纤激光器,由双段拼接掺铒光纤作为增益介质。该设计通过引入互补色散,有效实现了腔内色散管理与光谱展宽。在光纤放大器部分,第一级光纤放大器采用前向泵浦方式,第二级光纤放大器采用双向泵浦方式。经过放大后的脉冲利用 2.0 m 单模光纤实现脉冲压缩,最终获得光谱带宽 78.39 nm,脉宽经 Sech² 拟合为 49 fs、两级放大后输出最大平均功率为 145.5 mW,对应峰值功率为 65.3 kW 的飞秒脉冲,对应的单脉冲能量为 3.20 nJ。

关键词: 掺铒光纤激光器; 碳纳米管锁模; 光谱展宽

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250256

CSTR: 32170.14.CJL.20250256

Ultrashort Pulse Fiber Laser with A Dual-segment Spliced Erbium-doped Fiber Seed

CHAO Juqing, WANG Ji*, ZHANG Guohan, XU Binbin

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: jijiw@163.com

Abstract: This paper reports on an ultrashort pulse femtosecond fiber laser based on mode-locking with a two-segment spliced erbium-doped fiber. The laser consists of a seed source, a two-stage fiber amplifier, and a pulse compression section. The seed source is a single-walled carbon nanotube (SWCNT) mode-locked erbium-doped fiber laser, which uses a two-segment spliced erbium-doped fiber as the gain medium. This design effectively achieves intracavity dispersion management and spectral broadening by introducing complementary dispersion. In the amplifier section, the first-stage fiber amplifier employs forward pumping, while the second-stage uses bidirectional pumping. The amplified pulses are compressed using only 2.0 m of single-mode fiber, ultimately producing femtosecond pulses with a spectral bandwidth of 78.39 nm, a pulse width of 49 fs (fitted with a Sech² profile), a maximum average output power of 145.5 mW after the two-stage amplification, a corresponding peak power of 65.3 kW, and a single-pulse energy of 3.20 nJ.

Keywords: erbium-doped fiber laser; carbon nanotube mode-locking; spectral broadening

1 引 言

在光通信以及材料特性分析等应用需求的推动下,超短脉冲激光器一直是激光科学领域的重要研究方向之一。光纤激光器凭借设计紧凑、结

构简单、稳定性好、热管理效率高等优势,在产生超短脉冲上具备独特竞争力^[1]。其中,被动锁模技术无需外部调制器件,依托非线性效应即可实现锁模,使光纤激光器兼具稳定性强、易于集成等突出特点,因此成为数十年来超短脉冲研究的核

收稿日期: 2025-11-25; 修订日期: 2025-12-16

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20260102282JC)

Supported by Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (20260102282JC)

心热点^[2-3]。对于被动锁模激光器而言,可饱和吸收体是核心元件,采用真实可饱和吸收体可通过较低泵浦功率实现自启动锁模^[4-5]。近年来,单壁碳纳米管(SWCNT)^[6-12]因具有宽吸收带宽、超快恢复时间(约 1 ps)^[13-14]、高损伤阈值、成熟的制备过程和低成本等优势^[15],已在光纤激光器中作为可饱和吸收体得到广泛应用^[16-18]。

光纤作为柔性波导,在赋予光纤激光器上述优势的同时,也引入了色散和非线性效应^[2]。脉冲在光纤中传输时,较小的纤芯波导容易产生较高的功率密度,所激发的非线性效应会累积较高的非线性相移,导致脉冲分裂为多个脉冲或者塌陷为类噪声脉冲^[19]。为了产生超短脉冲光纤激光,平衡或者抑制非线性效应成为关键。传统的被动锁模机制有孤子锁模^[20]、耗散孤子锁模^[21]、自相似锁模^[22]、展宽脉冲锁模^[23]。其中,自相似锁模脉冲凭借其线性啁啾特性在获得更短脉宽方面具有优势,但该机制通常依赖较强的正色散、较长的增益光纤以及非线性管理,对腔体结构和参数稳定性要求较高。耗散孤子锁模在净正色散腔内通过滤波、增益与损耗的协同作用形成稳态脉冲,其腔内脉冲通常具有较大的啁啾,需要引入额外的滤波与调控手段,对系统参数设置具有一定依赖性。展宽脉冲锁模依赖脉冲在正负色散段中的周期性演化实现峰值功率降低,但对腔内色散分布及其精确匹配提出了较高要求。尽管展宽脉冲、自相似及耗散孤子锁模在输出更短脉冲方面表现优异,但它们往往需要复杂的腔体设计或对光纤参数的严苛匹配,增加了系统的成本与结构复杂度。相比之下,孤子锁模根据色散与非线性平衡可在更简单的腔体结构中实现稳态超短脉冲输出,在脉冲压缩后能够实现更高的峰值功率与稳定性,依然是产生高质量飞秒脉冲的理想选择。

如何保留其结构简单的优势,同时突破其功率限制并获得极短脉宽,是当前光纤激光器研究的重要方向。许多研究开展了相关工作,2016年,杨珍等利用透射光栅将脉宽从 1.699 ps 压缩为 84 fs^[24];2020年,曹顺采用 2.82 m 单模光纤进行脉冲压缩,获得输出功率 30 mW、脉冲宽度 85 fs 的超短脉冲^[25];2025年,谭欣等采用双光栅结构对输出脉宽进行压缩,实现 233 fs 脉宽的激光输出^[26]。

然而,上述方案存在功率低及结构复杂的问

题。鉴于此,本文搭建了反常色散孤子锁模光纤激光器,其种子源由双段拼接掺铒光纤作为增益介质,其中第一段掺铒光纤为具有负色散的 Er80 光纤,第二段掺铒光纤为正色散的 EDF80 光纤,由 SWCNT 作为可饱和吸收体实现被动锁模。初始脉冲经两级光纤放大及单模光纤进行脉冲压缩后,获得了稳定超短脉冲输出。此外,为进一步增强光谱展宽效应并提高系统的输出功率,两级光纤放大分别采用了前向泵浦与双向泵浦的设计。其中,一级放大保持了种子脉冲的时域与频域特性,提高输出功率;二级放大增强了光谱展宽效应并提高输出功率,实现对增益分布与非线性累积的优化。放大后的脉冲在单模光纤中通过色散补偿进行压缩,我们通过截断优化法^[27],并协同优化种子源与放大器的泵浦功率,在特定压缩光纤长度下实现了最短脉冲输出。本文利用单模光纤极大程度上获得了结构简单及成本低等优势,最终实现了一个高效、稳定且具有宽光谱的飞秒光纤激光器。

2 实 验

实验所用的可饱和吸收体为自制碳纳米管薄膜,由 1 mg 超高纯 SWCNT 粉末和 2 mL 羧甲基纤维素钠(NaCMC)制成的成膜剂溶液均匀混合超声 10 h 以上。首先,将混合溶液滴涂在载玻片上,静置干燥后制成薄片;然后,取约 2 mm²的薄片,夹在两个光纤跳线的陶瓷头端面之间,通过法兰连接,制成三明治结构的可饱和吸收体。对 SWCNT 制成的可饱和吸收体(SWCNT-SA)的调制深度进行了测量,测量装置如图 1 所示。为了验证 SWCNT/NACMC 的传输特性,使用中心波长 1 562 nm、脉宽为 850 fs、重复频率为 40.72 MHz 的激光器作为光源,使用机械式可调光衰减器(OM-MVOA-1550-SM)控制发射到 SWCNT/NACMC 的光功率,最后使用平衡双探测器法^[28]测量传输光功率。测得 SWCNT/NACMA 的非线性可饱和吸收曲线如图 2 所示,随着峰值功率从 0 W 逐渐增加至 35 W,传输透过率逐渐增加最后达到饱和,在峰值功率约 15 W 附近时慢慢趋于饱和,可得其调制深度为 3.64%。

超短脉冲激光器实验结构如图 3 所示,由种子源、两级光纤放大器以及脉冲压缩部分组成。在种子源中我们使用了 980 nm 的 LD1 连接 980/1 550 nm 的波分复用器(WDM1),为了提高增益

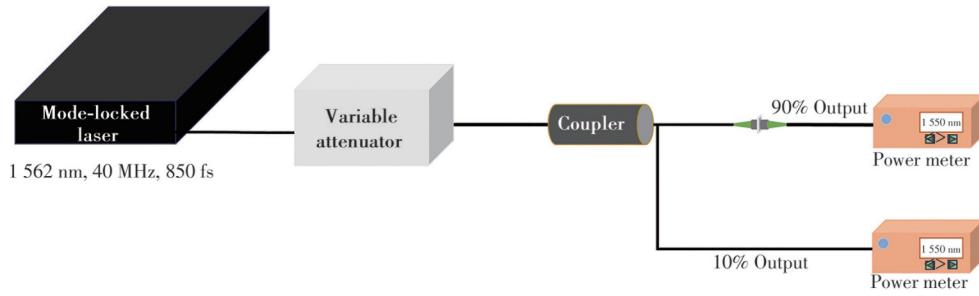


图 1 测量 SWCNT/NaCMC 非线性可饱和吸收的实验装置图

Fig.1 Experimental setup for measuring the nonlinear saturable absorption of the SWCNT/NaCMC composite

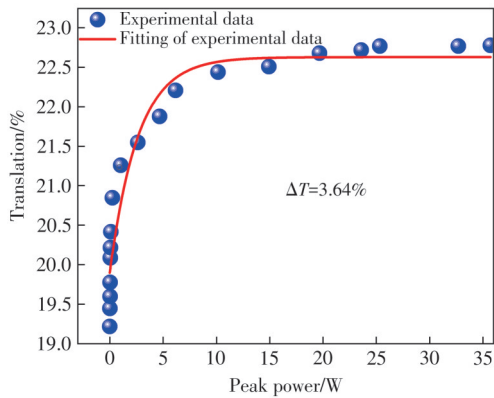


图 2 SWCNT/NACMC 非线性可饱和吸收测量结果与拟合曲线

Fig.2 Characterization of the nonlinear saturable absorption of SWCNT/NaCMC: Experimental data and fitting curve

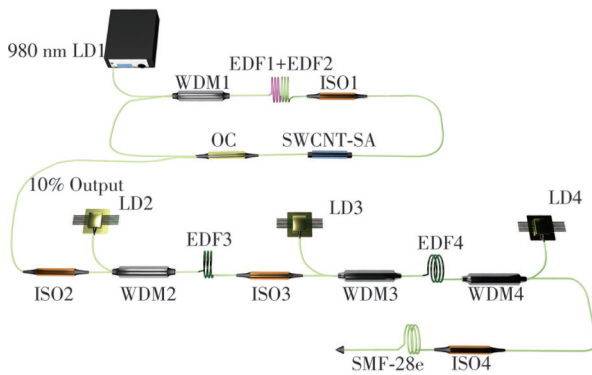


图 3 SWCNT 锁模的超短脉冲光纤激光器

Fig 3 Fiber laser generating ultrashort pulses incorporating a SWCNT saturable absorber

且控制色散,在种子源中拼接双段不同参数的掺铒光纤充当增益介质(EDF1+EDF2)并连接光隔离器(ISO1),锁模元件为 SWCNT-SA,最后从 90:10 的光耦合器(OC)中输出 10% 的光进行后续二级光纤放大。整个环形腔所使用的器件中,WDM1 的尾纤为 ofs980 光纤,其群速度色散为正且数值小可忽略不计,其余尾纤均为负群速度色散的 SMF-28e 光纤,经计算可得种子源腔内净色散值为 -0.067 ps^2 。

一级光纤放大使用前向泵浦方式,二级光纤放大使用双向泵浦,一级光纤放大使用高色散低增益的 EDF80 作为增益介质,二级光纤放大使用高增益低色散的 Er110 作为增益介质,最后连接单模光纤(SMF-28e)进行脉冲宽度压缩输出飞秒脉冲。表 1 给出了该激光器中所有的光纤型号参数与光纤长度。

表 1 SWCNT 锁模的超短脉冲光纤激光器中所有光纤参数

Tab. 1 Optical fiber parameters of the SWCNT mode-locked ultrashort pulse fiber laser

	$\beta_2/(\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1})^a$	L/m^b	$\kappa/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})^c$
EDF1	-20	0.23	80
EDF2	+61	0.24	80
EDF3	+61	1.8	80
EDF4	+19	0.7	110
SMF-28e	-22	6.3	—
ofs980	+1	1.7	—

注:^a β_2 : the GVD parameter at 1550 nm; ^b L : the fiber length; ^c κ : the peak absorption at 1530 nm; EDF1: Er80-8/125 (nLIGHT); EDF2 and EDF3: EDF80(OFS, a Furukawa company); EDF4: Er110-4/125 (nLIGHT); SMF-28e: SMF-28e(Corning)。

实验中使用以下仪器对激光器的输出信号进行测量:500 MHz 的示波器(Tektronix MDO3054)、光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)、自相关仪(APE PulseCheck 150)、26.5 GHz 的 RF 频谱分析仪以及功率计(Thorlabs PM100D)。

3 结果与讨论

当 LD1 输出泵浦功率为 28 mW 时种子源实现自启动锁模,以 40.72 MHz 的重复频率生成中心波长在 1562 nm 的传统孤子锁模光纤激光。泵浦功率由 28 mW 增加至 75 mW 能实现稳定锁模运转,继续增加泵浦功率导致锁模脉冲不稳定,最终无法实现锁模。当泵浦功率为 55 mW 时锁模脉冲稳定,输出平均功率为 0.408 mW。如图 4(a)

所示为SWCNT锁模激光器的脉冲序列,可以看出脉冲振幅波动不大,说明锁模激光器的输出脉冲稳定。图4(b)所示为锁模激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线,随着泵浦功率的增加,输出功率与单脉冲能量都与其呈线性增长关系。锁模脉

冲频谱如图4(c)所示,在频谱仪分辨率为1 KHz时的基频脉冲信噪比可达72.9 dB,也表明脉冲具有高稳定性。图4(d)所示为脉冲光谱,此时3 dB带宽为5.5 nm,该光谱两侧有微弱的 Kelly 边带,是典型的传统孤子标志。

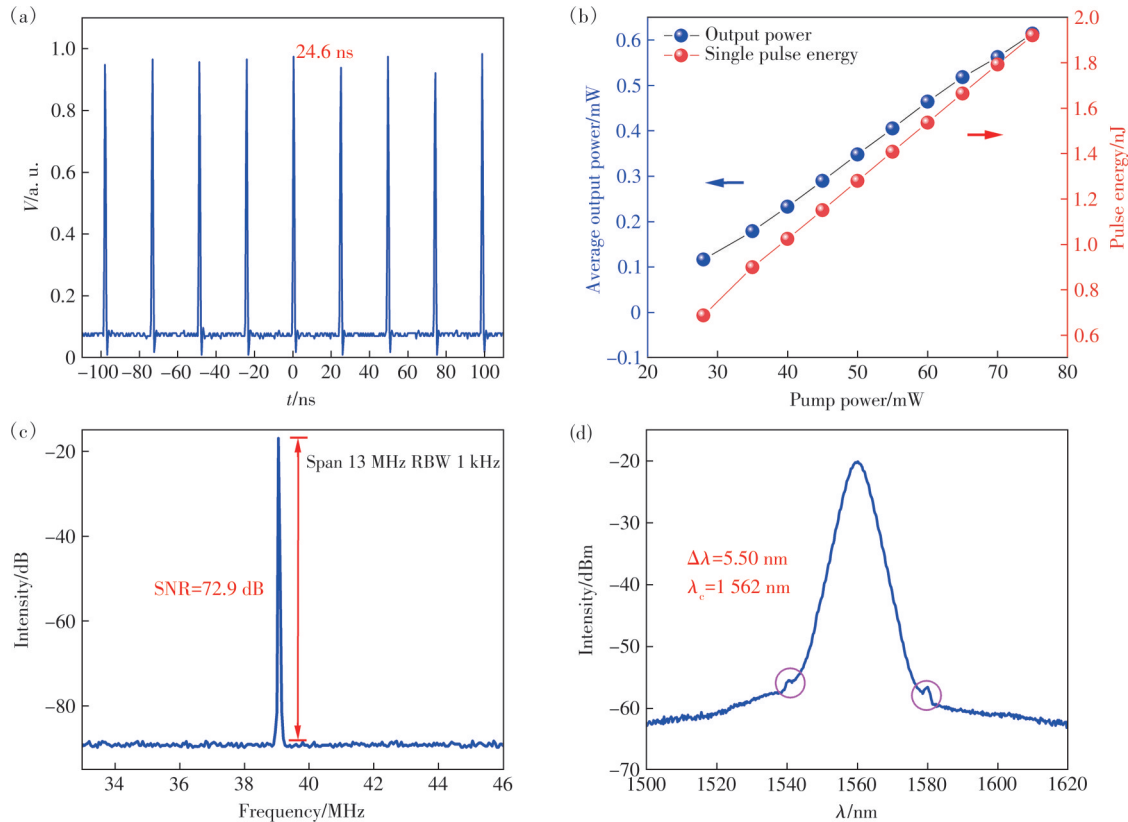


图4 (a)锁模运行对应脉冲序列;(b)输出平均功率和单脉冲能量;(c)13MHz跨度下的射频频谱;(d)锁模稳定运行时输出光谱

Fig.4 (a) Pulse train corresponding to the mode-locked operation. (b) Output average power and single-pulse energy. (c) RF spectrum at a span of 13 MHz. (d) Output optical spectrum recorded under stable mode-locked operation

当种子源只有EDF1且长度为0.25 m时,种子源能实现稳定锁模并输出传统孤子。如图5(a)所示,泵浦功率在55 mW时输出最宽光谱为4.89 nm,中心波长在1561 nm处。当种子源中只有EDF2,长度0.25 m时未能实现锁模,后将EDF1与EDF2拼接发现可实现稳定锁模,并且在泵浦功率为55 mW时光谱宽度为5.50 nm(如图4(d)所示);当泵浦功率增加到75 mW时输出光谱宽度为10.52 nm,比只有EDF1时展宽了5.63 nm,如图5(b)所示,中心波长偏移至1562 nm,这是由于EDF光纤长度增加使得中心波长发生红移。用图4(d)所示的光谱进行后续功率放大及脉冲宽度压缩,此时泵浦功率为55 mW,相比于图5(b)的Kelly边带,此时光谱的Kelly边带更微弱,Kelly边带更弱意味着系统更稳定,孤子脉冲质量

更高^[29-31]。

为了进一步测试激光器输出脉冲的稳定性,实验中每隔20 min采集一次输出功率数值,对激光器输出功率进行了长达4 h的连续测量。脉冲功率稳定性测试结果如图6所示,表明该激光器具有优异的长期稳定性。

在后续放大级中,一级光纤放大使用前向泵浦,二级光纤放大使用双向泵浦。为避免非线性效应在一级放大阶段提前触发,从而引起光谱畸变和系统不稳定,本文选择将一级放大泵浦功率控制在130 mW,一级光纤放大输出功率随泵浦功率的变化如图7插图所示。在种子源输出稳定锁模脉冲的基础上,采用130 mW前向泵浦进行一级放大时输出平均功率9.28 mW,输出光谱曲线如图7所示,其中红色为拟合曲线,尽管在长波

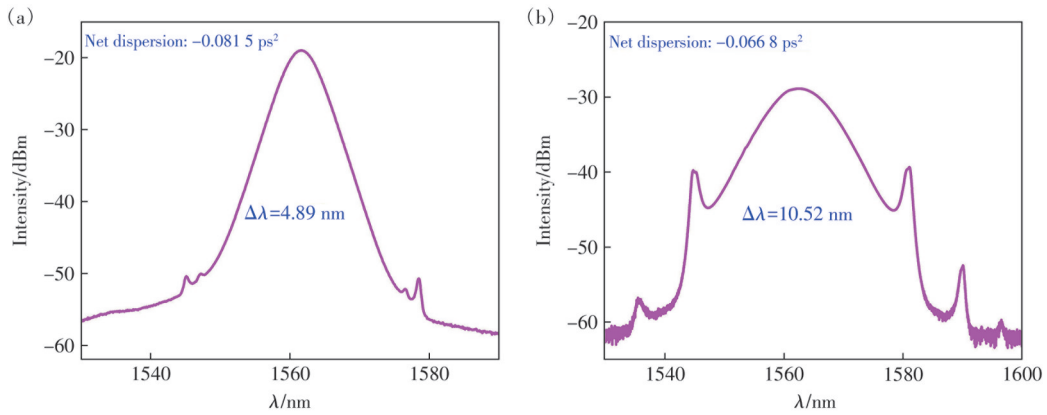


图 5 种子源的增益光纤为(a)EDF1;(b)EDF1+EDF2时的锁模输出光谱

Fig.5 Mode-locked optical spectra from the seed source employing (a)EDF1 and (b)EDF1+EDF2 as the gain medium

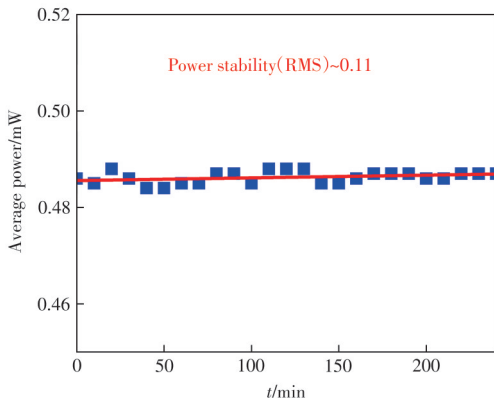


图 6 脉冲序列 4 h 的功率稳定性

Fig.6 Long-term power stability of the pulse train monitored over 4 hours

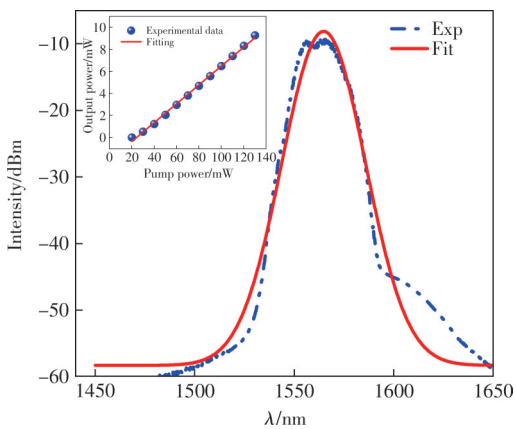


图 7 泵浦功率为 130 mW 时输出光谱, 红色实线为拟合曲线(插图: 一级放大输出功率变化曲线)

Fig.7 Output spectrum (red solid line; fit) at 130 mW pump power and the first-stage amplifier's output (inset)

波段存在轻微失配, 该光谱仍能很好地吻合拟合曲线。该实验现象表明, 该泵浦功率既能保证足够的信号增益, 又能避免剧烈展宽引起光谱分裂, 为二级放大中的孤子形成与后续压缩提供了良好基础。

随后连接双向泵浦结构的二级光纤放大, 前向泵浦功率增加至 614 mW, 后向泵浦功率增加至 625 mW, 输出最大平均功率如图 8(a)所示为 145.5 mW, 此时峰值功率为 65.3 kW; 光谱展宽至 78.39 nm, 光谱形状随泵浦功率变化如图 8(b)所示。光谱展宽主要由放大过程中的自相位调制 (SPM) 主导, 随着泵浦功率提升, 脉冲峰值功率和非线性相移显著增强, 使得光谱两侧不断扩张。同时, 在高增益条件下, 部分光谱结构受到四波混频 (FWM) 和交叉相位调制 (XPM) 的影响, 在色散与非线性效应的作用下进一步放大了展宽效应, 使输出光谱在高泵浦下呈现出明显的宽带化特征。该过程不仅体现了系统内高阶孤子的形成与演化, 也反映了二级放大阶段非线性效应控制的关键性。

二级放大后系统的信噪比为 64 dB, 如图 8(c)所示, 相较于种子源有所下降, 因为掺铒光纤放大器在放大的同时会有自发辐射被放大。在最大输出功率下脉冲宽度如图 8(d)所示为 1.34 ps, 采用截断法对二级光纤放大后的激光脉冲宽度进行压缩, 用 SMF-28e 进行色散补偿及脉冲宽度压缩, 压缩后脉冲的自相关曲线如图 9 所示, 实现了利用 2.0 m 长的 SMF-28e 就成功将脉冲宽度压缩至 49 fs, 是傅里叶变换极限脉宽 33 fs 的 1.48 倍, 压缩效果显著。

为了展示本系统的性能优势, 我们将本工作与近年来报道的其他同类型光纤激光器进行了比较, 总结于表 2 中。如表 2 所示, 虽然部分采用棱镜或其他类型光纤进行压缩的研究实现了更短的脉宽^[22,28,32-34], 但本工作利用 SMF-28e 即实现了 49 fs 的脉宽。与采用类似 SMF-28e 压缩方案的工

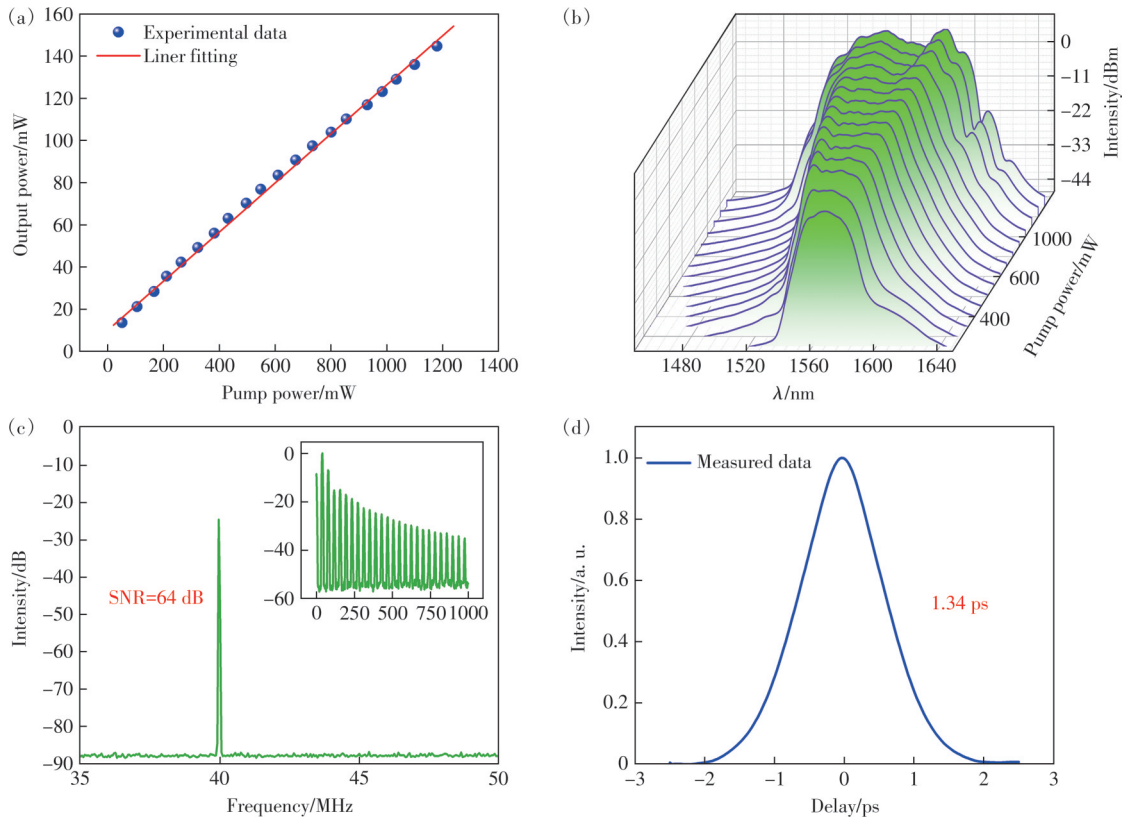


图 8 (a) 二级放大平均功率输出; (b) 二级放大光谱随泵浦功率改变的演变图; (c) 二级放大时信噪比输出 (插图为 0-1 GHz 范围内的频谱); (d) 二级放大为压缩前脉宽

Fig.8 (a) Average output power from the second-stage amplifier. (b) Evolution of the output spectra with increasing pump power. (c) Signal-to-noise ratio (SNR) of the amplified output (inset shows the RF spectrum within the 0-1 GHz range). (d) Pulse width before compression

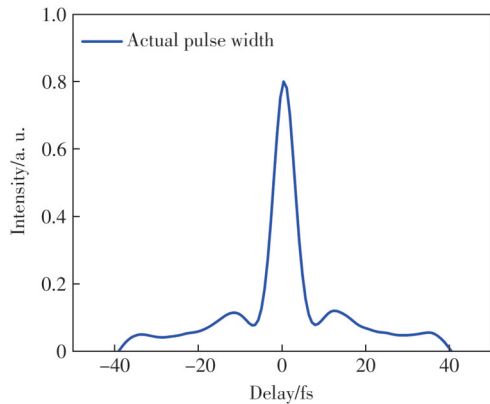


图 9 压缩输出测得的自相关轨迹

Fig.9 Autocorrelation characterization of the pulses after compression

作^[22,32-33]相比,我们的系统在保持 145.5 mW 高平均功率的同时实现了更短的脉宽。这表明,该方案在系统紧凑性、输出功率和脉冲宽度之间取得了极佳的平衡。然而,自相关迹线中仍存在轻微的基座,这主要归因于未补偿的三阶色散(TOD)以及放大阶段累积的非线性相移^[35]。未来的工作

表 2 同类型飞秒光纤激光器相关研究参数

Tab.2 Research parameters for femtosecond fiber lasers with identical structures

锁模机制	压缩方式	输出平均功率/mW	脉冲宽度/fs	参考文献
自相似锁模	SMF	39.51	283	[22]
孤子锁模	SMF+HNLF+棱镜对	100	14	[28]
自相似锁模	SMF	193	75.6	[32]
自相似锁模	SMF	120	22.7	[33]
孤子锁模	DCF	43.56	88	[34]

可引入啁啾脉冲放大(CPA)技术或特种色散补偿光纤,以进一步抑制基座并提升脉冲质量。

4 结 论

针对飞秒光纤激光器结构简单与低成本的需求,本文提出了一种基于双段不同色散的掺铒光纤作为增益介质的掺铒光纤激光器方案。本实验搭建了基于单壁碳纳米管锁模的掺铒光纤激光器,采用双段不同色散的掺铒光纤作为增益介质,搭建了种子源谐振腔,实现了稳定的锁模脉冲输

出,尤其是经过前向泵浦的一级光纤放大器、双向泵浦的二级光纤放大器后观察到明显的光谱展宽现象,最大展宽至 78.39 nm,两级放大后输出最大平均功率为 145.5 mW,对应峰值功率高达 65.3 kW,对应于单脉冲能量 3.20 nJ。最终利用 2.0 m 单模光纤即将脉宽压缩至 49 fs,极大程度地实现了简单紧凑的压缩机制。综上所述,该激

光器结构简单、稳定性好,兼具高稳定性与低成本优势,为开发低成本、免维护的工业级飞秒激光器提供了技术参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250256>

参 考 文 献:

- [1] 张大鹏,胡明列,谢辰,等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 044206.
 ZHANG D P, HU M L, XIE C, *et al.* A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2012, 61(4): 044206. (in Chinese)
- [2] FU W, WRIGHT L G, SIDORENKO P, *et al.* Several new directions for ultrafast fiber lasers [invited] [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(8): 9432-9463.
- [3] FERMAN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [4] GAO X B, ZHAO Z G, CONG Z H, *et al.* Stable 5-GHz fundamental repetition rate passively SESAM mode-locked Er-doped silica fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(6): 9021-9029.
- [5] DAI M L, LIU B W, MA Y F, *et al.* 783 MHz fundamental repetition rate all-fiber ring laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2024, 17(6): 062001.
- [6] MARTINEZ A, YAMASHITA S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(7): 6155-6163.
- [7] NICHOLSON J W, DIGIOVANNI D J. High-repetition-frequency low-noise fiber ring lasers mode-locked with carbon nanotubes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 20(24): 2123-2125.
- [8] SENOO Y, NISHIZAWA N, SAKAKIBARA Y, *et al.* Ultralow-repetition-rate, high-energy, polarization-maintaining, Er-doped, ultrashort-pulse fiber laser using single-wall-carbon-nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(20): 20673-20680.
- [9] JEONG H, CHOIS Y, ROTERMUND F, *et al.* All-fiber mode-locked laser oscillator with pulse energy of 34 nJ using a single-walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(19): 22667-22672.
- [10] JEONG H, CHOIS Y, ROTERMUND F, *et al.* Pulse width shaping of passively mode-locked soliton fiber laser *via* polarization control in carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(22): 27011-27016.
- [11] WANG F, ROZHIN A G, SUN Z, *et al.* Fabrication, characterization and mode locking application of single-walled carbon nanotube/polymer composite saturable absorbers [J]. *Int. J. Mater. Form.*, 2008, 1(2): 107-112.
- [12] HASAN T, SUN Z P, WANG F Q, *et al.* Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. *Adv. Mater.*, 2009, 21(38-39): 3874-3899.
- [13] LAURET J S, VOISIN C, CASSABOIS G, *et al.* Ultrafast carrier dynamics in single-wall carbon nanotubes [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(5): 057404.
- [14] CHEN Y C, RARAVIKAR N R, SCHADLER L S, *et al.* Ultrafast optical switching properties of single-wall carbon nanotube polymer composites at 1.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(6): 975-977.
- [15] LI X H, WANG Y G, WANG Y S, *et al.* Yb-doped passively mode-locked fiber laser based on a single wall carbon nanotubes wallpaper absorber [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2013, 47: 144-147.
- [16] POPA D, SUN Z, HASAN T, *et al.* 74-fs nanotube-mode-locked fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(15): 153107.
- [17] SENOO Y, NISHIZAWA N, SAKAKIBARA Y, *et al.* Polarization-maintaining, high-energy, wavelength-tunable, Er-doped ultrashort pulse fiber laser using carbon-nanotube polyimide film [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(22): 20233-20241.
- [18] LIU X S, ZHAN L, LUO S Y, *et al.* Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a nonlinear amplifying loop mirror assisted by un-pumped EDF [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(7): 7088-7094.

- [19] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics: its history and recent progress [invited] [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, 28(12): A1-A10.
- [20] 张天琪. 孤子锁模光纤激光器中的谐振边带增强现象及双波长锁模激光研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
ZHANG T Q. *Resonant Sideband Enhancement Phenomenon and Dual-Wavelength Mode-Locked Laser Study in Soliton Mode-Locked Fiber Lasers* [D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
- [21] 田奕为. 基于高阶孤子动力学的相干超宽带耗散孤子光纤激光器研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2025.
TIAN Y W. *Coherent Ultra-Broadband Dissipative Soliton Fiber Laser Based on High-Order Soliton Dynamics* [D]. Changchun: Jilin University, 2025. (in Chinese)
- [22] 赵辉, 王蓓, 夏敬华, 等. 自相似锁模超短脉冲掺铒光纤激光器 [J]. 发光学报, 2025, 46(1): 110-116.
ZHAO H, WANG J, XIA J H, *et al.* Self-similar mode-locked ultrashort pulse erbium-doped fiber amplifier [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(1): 110-116. (in Chinese)
- [23] WOODWARD R I. Dispersion engineering of mode-locked fibre lasers [J]. *J. Opt.*, 2018, 20(3): 033002.
- [24] 杨珍, 柴路, 胡明列, 等. 大模场面积光子晶体光纤全正色散自相似锁模激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302005.
YANG Z, CHAI L, HU M L, *et al.* All-normal-dispersion self-similar mode-locked laser based on large mode area photonic crystal fiber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2016, 43(3): 0302005. (in Chinese)
- [25] 曹顺, 郝强, 曾和平. 掺铒单模光纤飞秒脉冲激光器和放大器 [J]. 光学仪器, 2020, 42(6): 66-72.
CAO S, HAO Q, ZENG H P. Erbium-doped single-mode fiber femtosecond pulse laser and amplifier [J]. *Opt. Instrum.*, 2020, 42(6): 66-72. (in Chinese)
- [26] 谭欣, 赵变丽, 徐智阳, 等. 百瓦级飞秒棒状光子晶体光纤激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2026, 38(1): 011003.
TAN X, ZHAO B L, XU Z Y, *et al.* Hundred-watt-level high-power femtosecond fiber laser [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2026, 38(1): 011003. (in Chinese)
- [27] WANG Z Q, ZHAN L, FANG X, *et al.* Generation of sub-60 fs similaritons at 1.6 μm from an all-fiber Er-doped laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2016, 34(17): 4128-4134.
- [28] KIEU K, JONES R J, PEYGHAMBARIAN N. Generation of few-cycle pulses from an amplified carbon nanotube mode-locked fiber laser system [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, 22(20): 1521-1523.
- [29] KE X Z, WU J L. Double balanced detection. -wavfont correction system [M]. KE X Z, WU J L. *Coherent Optical Wireless Communication Principle and Application*. Singapore: Springer, 2022: 239-292.
- [30] KIM J, SONG Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [31] HAUS H A. Mode-locking of lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, 6(6): 1173-1185.
- [32] PENG J S, ZHAN L, CHEN T Y, *et al.* All-fiber ultrashort similariton generation, amplification, and compression at telecommunication band [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, 29(9): 2270-2274.
- [33] LUO H, ZHAN L, ZHANG L, *et al.* Generation of 22.7-fs 2.8-nJ pulses from an erbium-doped all-fiber laser via single-stage soliton compression [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2017, 35(17): 3780-3784.
- [34] 陈虹桦, 林启蒙, 谢钦, 等. 用于远距离太赫兹时域光谱测量的飞秒激光系统研究(特邀) [J]. 光子学报, 2025, 54(11): 1154302.
CHEN H H, LIN Q M, XIE Q, *et al.* Research on femtosecond laser systems for long-distance terahertz time-domain spectroscopy measurement (invited) [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2025, 54(11): 1154302. (in Chinese)
- [35] MATSUI Y, PELUSI M D, SUZUKI A. Generation of 20-fs optical pulses from a gain-switched laser diode by a four-stage soliton compression technique [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1999, 11(10): 1217-1219.



晁举庆(1999-),女,青海海南州人,硕士研究生,2023年于青海师范大学获得学士学位,主要从事光纤激光器及放大器方面的研究。
E-mail: 17730924355@163.com



王蓓(1978-),女,山东青岛人,博士,教授,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光纤激光器及放大器方面的研究。
E-mail: jiji_w@163.com